

Chapitre I

Cinématique et dynamique

I Cadre général de la Mécanique classique

I-1 Qu'est-ce que le monde physique ?

Avant d'aborder l'étude mathématique et quantitative des phénomènes physiques, il est important de saisir quels sont la motivation et le projet de cette *Philosophie Naturelle* aujourd'hui appelée simplement « Physique ». Nous avons donné dans l'introduction quelques indications à ce sujet, rappelant en particulier que la notion même de *phénomène physique* était aussi incertaine que mystérieuse, et nous y renvoyons expressément le lecteur.

Si elle consiste essentiellement en l'étude de ce qu'on appelle communément le « monde physique », et vise à la compréhension de ses propriétés, de ses modes de manifestation et autant que possible de sa nature, cette discipline ou voie de recherche a vu le cadre dans lequel elle opère se modifier considérablement au cours des âges, comme a d'ailleurs évolué la manière dont nous nous représentons le monde, et comme évolue également pour chacun de nous, au cours de notre développement psychologique, l'idée même de monde physique.

« Qu'est-ce que le monde physique ? » est bien finalement la question centrale de la Physique, et si des générations de physiciens, mathématiciens, philosophes, penseurs, hommes et femmes de connaissance en général ont porté tant d'attention à la caractérisation des phénomènes physiques et à l'architecture de l'univers qui nous est accessible, c'est dans l'espoir qu'une identification des mécanismes clés et une compréhension des principes qui régissent l'organisation spatiale et temporelle de ces phénomènes, permettront d'apporter des éléments de réponse à cette question fondamentale.

Peut-être parviendra-t-on en effet, en étudiant le monde physique aussi précisément, fidèlement et justement que possible, d'une part à mieux le définir, c'est-à-dire à mieux cerner ce qu'il est (et au passage ce qu'il n'est pas !), et d'autre part à percevoir sa nature ou son essence, à partir de son comportement apparent et de la manière dont il se manifeste à notre perception, à notre conscience. Vaste programme !

Les présupposés, le cadre conceptuel et pour ainsi dire la syntaxe de la physique aristotélicienne, par exemple, sont très différents de ceux de la physique newtonnienne, eux-mêmes très différents de ceux de la physique quantique et plus encore sans doute de ceux des physiques à venir. Ce que nous développerons ici, ce sont les bases de la Mécanique dite *classique*, qui constitue le cœur de la Physique telle qu'elle fut développée *grasso modo* de Galilée à Einstein, et qui repose sur l'idée que :

Physique classique

- les phénomènes physiques concernent des corps matériels existant objectivement par eux-mêmes et localisés dans un espace intangible, inaltérable et permanent, répondant à la formalisation euclidienne ;

- l'état du monde physique est univoquement caractérisé par la définition et la disposition des différents corps matériels au sein de cet espace, qui constituent absolument et totalement un instant de la réalité¹ ;
- les instants, et donc les états du monde qu'ils réalisent, se succèdent selon un ordre temporel continu et universel, satisfaisant à une structure causale linéaire (répondant à un déterminisme strictement orienté) et locale, compatible avec l'existence objective de constituants matériels élémentaires, reconduits d'instant en instant.

La Physique a pris acte aujourd'hui de ce que chacune de ces assertions² est en réalité fautive, et que chacun des éléments qui la composent renvoie à des présupposés³ erronés. Mais c'est bien selon un tel formalisme que s'organise une certaine conscience intuitive du monde, lorsqu'on la projette en sa propre limite, et que notre rapport ordinaire avec le monde nous induit à nous représenter rationnellement la réalité physique. Cette intuition, que nous avons nommée dans l'introduction l'*intuition mécaniste*, renferme donc des éléments très importants de ce que le monde physique représente pour une conscience humaine, et toute théorie physique, même basée sur des concepts entièrement différents, devra être capable d'en rendre compte à titre d'approximation pertinente ou de comportement effectif, dans un certain cadre d'expérience propre à notre participation objective au monde manifesté.

I-2 L'espace-temps-matière

corps matériel Parmi les éléments introduits ci-dessus dans le cadre de la description des présupposés de la Physique classique, se trouve la notion fondamentale de *corps matériel*. Nous serions bien en peine de définir précisément ces termes, et le fait est que la Physique ignore toujours ce qu'est précisément la matière. Le découvrir est peut-être sa quête la plus ardente. Mais puisque notre approche consiste précisément à explorer ce que recouvrent et jusqu'où peuvent nous mener les notions élémentaires qui se présentent intuitivement à nous, cette difficulté ne sera pas gênante ici, et nous nous en tiendrons à l'acception la plus large et la plus vague véhiculée par le mot *chose*.

chose Le monde physique se présente donc à nous comme un ensemble de « choses », que nous pouvons appréhender de diverses manières, en liaison directe ou indirecte avec la *perception sensible*. La racine latine du mot *chose* nous donne quelques indications sur le contenu de cette intuition empirique fondamentale : *causa*, en latin, désigne la *cause*, mais au sens juridique avant le sens déterministe (de cause efficiente, motif), c'est-à-dire se rapporte à la notion de *procès*, d'*affaire*, bref, à un ensemble d'éléments que l'on rassembler autour d'un fait donné, et que l'on peut en quelque sorte poser devant soi – et devant tous ! –, pour un examen objectif. Une chose, un *objet* (objectif ou objectifé), c'est cela l'élément de base de la physique mécaniste qui nous intéresse ici. Quant à la « matière », elle en est la substance constitutive, et à son tour l'origine latine du mot *matière* (*materia*, directement associé au bois, notamment au bois de construction, comme c'est le cas aujourd'hui encore en espagnol, *madera* ou en portugais, *madeira*, et relié aussi à *mater*, la mère, comme source et matrice de tout matériau solide et consistant) suggère une certaine solidité, une consistance vis-à-vis de l'environnement, mais aussi et peut-être surtout une consistance intrinsèque. Nous préciserons plus loin comment définir précisément la notion de « corps solide » en Physique. Pour le moment, remarquons enfin que cette « matière » se présente à notre intuition comme « la » substance directement concernée par la Physique, au point que l'on a pu confondre – à tort !⁴ – Physique et Matérialisme.

Ainsi :

¹ voir ci-dessous la discussion relative à la notion d'instant

² avec les hypothèses non explicitement formulées qu'elles impliquent

³ généralement inconscients

⁴ notamment en raison de la naïveté de notre intuition relative à la matière

- la matière est la substance, solide en un certain sens intuitif, composant les choses/objets, support des phénomènes physiques et cause des événements/perceptions sensibles.

Discussion I.1 Anticipant quelque peu sur des notions que nous introduirons plus tard, il est intéressant de noter qu'en Mécanique Classique, il n'y a qu'une matière, d'un seul type, et que si les corps peuvent manifester des propriétés différentes (plasticité, dureté, densité, capacité calorifique, viscosité, etc.), c'est supposément en raison d'arrangements divers des constituants élémentaires soumis aux lois de la mécanique, de jeux de forces différents entre ces constituants, et/ou pour des raisons ayant trait à la chimie, dont les fondements et les liens avec la Physique ne sont pas clairement précisés ni compris. Le seul paramètre pertinent, du point de vue mécanique, est la *masse* du corps considéré. Les questions de *substances* différentes, et donc de transformation entre substances, ne sont pas traitées par la Mécanique Classique, et il a fallu attendre le XX^e siècle pour que la Chimie unisse ses fondements à ceux de la Physique, qui l'englobe aujourd'hui pleinement en principe. Cette fusion s'est établie dans le cadre de la Mécanique Quantique, qui reconnaît différents *types* de "matière", distingués par des attributs intrinsèques divers (*charges quantiques*). Mais le cadre conceptuel de la physique quantique est très différent de celui évoqué plus haut, et la notion de matière y est radicalement différente.⁵ Même la notion de *force*, centrale en Mécanique Classique, comme nous le verrons plus bas, s'effondre dans le cadre quantique, remplacée par celle d'*interaction*, en un sens spécifique.

unicité de la matière

Pour ce qui nous concerne ici, la matière est donc une et universelle ; il n'y a qu'une matière véritable et les corps sont caractérisés du point de vue la Mécanique Classique par le seul paramètre *masse* (voir plus bas) : deux corps élémentaires⁶ de même masse ont un comportement mécanique identique, et réagissent de manière analogue s'ils sont soumis aux mêmes forces. Ce qui distingue les différentes substances physiques apparentes, dans ce cadre conceptuel, ce sont dès lors les forces qui s'établissent entre leurs constituants et que ceux-ci peuvent exercer sur ceux d'autres corps, mais la Physique classique ne précise pas l'origine des forces (sauf dans le cas de la gravitation) et ne parvient pas à déterminer ces forces autrement que de manière phénoménologique, comme approximations de l'effet global d'un nombre gigantesque d'interactions entre composants plus élémentaires. Ces interactions, elles, ne peuvent pas être traitées classiquement, ce qui montre d'une autre manière que la Physique classique est intrinsèquement limitée dans sa validité et dans sa portée : afin de rendre compte des différences de comportement de différentes substances matérielles, la Physique classique invoque des jeux de forces différents entre constituants, mais cette interprétation ne peut être validée jusqu'au bout puisque lesdites forces échappent au formalisme classique et, ce faisant, en sapent donc le fondement.

Notons pour terminer cette discussion que la question de la multiplicité des apparences et de l'unité de l'essence a été longuement méditée par les philosophes/physiciens Grecs (en particulier...), qui ont parfaitement vu les enjeux du problème et anticipé la situation qu'à dû affronter la Physique classique plus de deux millénaires plus tard, leur apportant d'ailleurs essentiellement les mêmes réponses, en termes d'agencements différents d'entités élémentaires semblables, et/ou de combinaisons en proportions variées d'un petit nombre d'éléments distincts... ●●●

Dans la réalité physique, les « choses » matérielles se présentent à la conscience selon une certaine organisation spatiale et temporelle. Définir l'espace et le temps n'est pas plus aisé que définir la matière, mais nous pouvons tenter de préciser la manière dont ils apparaissent dans le formalisme de la Mécanique classique. Dans l'intuition commune que nous en avons, les deux notions d'espace et de temps ont des caractéristiques pour ainsi dire *en miroir* : dans le langage de Leibniz, l'espace est l'ordre des coexistants simultanés, et le temps l'ordre de succession des coexistants.

L'espace marque originellement l'étendue, le champ disponible (le latin *spatium* désigne le champ de course, l'arène). La notion d'espace comme ensemble de points, de « lieux », est déjà une construction abstraite, une mathématisation de la notion intuitive, qui nous est aujourd'hui familière mais qui ne l'était pas de manière aussi nette avant le développement de la géométrie cartésienne et de la Mécanique classique. Ceci offre d'ailleurs un exemple de la façon dont la réflexion sur des notions empiriques intuitives peut modeler ou remodeler notre vision du monde – exemple que l'on pourrait en l'occurrence poursuivre encore avec le dépassement moderne de cette formalisation ensembliste naïve, et la reconnaissance de l'espace comme notion essentiellement relationnelle, ainsi que l'avaient parfaitement anticipé des philosophes tels que Leibniz.

espace

Gottfried Wilhelm von Leibniz (1646–1716)

⁵Notons d'ailleurs que la question de l'unification des différents champs quantiques – que l'on peut rapprocher, de manière analogue ou fonctionnelle, du rôle joué par la matière en théorie classique – n'est pas tranchée, et fait l'objet d'intenses recherches...

⁶Mais cette notion reste à préciser, et la Mécanique Classique s'en garde bien ! De fait, il lui est impossible de le faire, car le comportement des corps qu'elle serait conduite à considérer comme élémentaires au sein de son cadre conceptuel viole ouvertement et radicalement ses propres principes !

Ainsi, la notion originelle d'espace n'est pas celle d'un espace réceptacle des choses, qui leur préexisterait, mais plutôt d'un espace qui *distingue* les choses, qui les tient « à l'écart » l'une de l'autre, et qui fait ainsi que l'on puisse bel et bien les considérer séparément, l'une « ici », l'autre « là », coexistantes mais identifiées distinctement (étymologiquement : épinglées ou étiquetées à part).

Dans la notion d'espace, il y a donc de la *distance* avant d'y avoir des lieux, et les lieux ne sont justement distinguables que parce qu'il y a de l'espace *entre* eux.⁷

temps Le temps, quant à lui, ne distingue pas des choses coexistantes, mais au contraire des états du monde qui ne sauraient coexister, qui sont existants chacun en sa réalité propre, à *l'exclusion* de tout autre. C'est, si l'on veut, l'ordre des existants non-coexistants.

La conscience, par essence, est toujours au présent, et selon notre intuition ordinaire de la réalité physique, ce qui *est*, à chaque *instant*, est totalement et exclusivement ce qui se tient simultanément dans la même actualité, dans la coexistence générale que définit cet instant même. Selon cette vue, *l'être* du monde n'est nulle part ailleurs que dans ce qui est manifestement établi en l'ensemble des *phénomènes* constituant le moment présent. Or dans la mesure où cet être du monde évolue, où la réalité physique effective se modifie, il y a à considérer un ensemble d'états distincts qui, chacun en son instant propre, constitue en totalité la réalité du monde, et qui, hors de cet instant propre, se trouve par là-même totalement étranger à la réalité.

Les différents instants se caractérisent donc d'une part par la réalité foncière des événements qu'ils font coexister, et d'autre part par leur exclusion réciproque. C'est ce que nous pourrions appeler le « réalisme instantané », ou « l'instantanéisme exclusif ». Néanmoins, l'intuition mécaniste établit un lien de continuité directe entre ces états non-coexistants du monde, et l'une des tâches de la Physique est précisément de décrire et de comprendre le lien existant entre les états correspondant à deux instants distincts : ce lien, ou ces liens, c'est ce que l'on nomme les *lois physiques*.

Le retour sur l'étymologie est, là encore, intéressant. Dans le mot *instant*, directement issu du latin *instans*, *instantis*, on trouve bien sûr comme racine principale le verbe *stare* (participe passé *status*), qui signifie « se tenir debout, ferme, immobile » (cf. *to stand*, en anglais), et qui a donné des mots comme *statique*, *stationnaire*, ou *constant*. De même, la *sub-stance*, c'est « ce qui se tient dessous », au fondement d'une chose.

distance Ce verbe est intéressant dans le contexte du temps et de l'espace qui nous intéresse ici, parce qu'il est présent à la fois dans *instant* et dans *distance*. Ce qui est *dis-tant* est « ce qui se tient séparé », en conformité à ce que nous avons dit de la notion première d'espace, dont l'essence est de maintenir séparées des positions identifiées en elles-mêmes, de permettre la coexistence de *lieux* distincts, qui se tiennent par eux-mêmes, comme des entités définies et intrinsèquement identiques, à tous égards, mais qui sont néanmoins distinguables parce que *séparés* : opérer cette séparation est précisément l'essence de la dis-tance.

instant Contrairement à *constant*, qui utilise le préfixe *con-*, « avec », et qualifie donc ce qui tient fermement *avec* autre chose, ce qui est identique à soi-même, instant après instant, mais en référence à un environnement ou vis-à-vis d'un processus en cours, le mot *instant*, par son préfixe *in-*, fait référence à ce qui se tient stable *en soi-même*, en référence à soi seul, isolé, donné en soi comme un tout. Un instant du monde, c'est ainsi en effet le monde total constitué, établi, entièrement contenu en lui-même. L'élément significatif, attesté par l'étymologie, est que dans le mot *instant*, le préfixe latin *in-* n'est pas celui qui désigne la négation (comme dans *inégal*, ou *inoffensif*), mais celui qui désigne l'intériorité (« dans, en, parmi », comme dans *inhaler* ou *inhérent*). Ainsi, l'instant n'est pas, comme une certaine perspective temporelle pourrait nous inciter à le croire, ce qui n'est *pas* stable, ce

⁷Le fondement de l'espace, c'est donc la distance entre les lieux, plutôt que la collection des lieux eux-mêmes. Le lecteur plus familier des développements ultérieurs de la Physique notera que c'est bien ce qu'on appelle la « métrique », c'est-à-dire l'objet mathématique qui indique ce que valent les distances entre les points de l'espace, qui joue le rôle central en Relativité Générale, par exemple. Le mot même de *métrique* indique que c'est la mesure, donc l'établissement d'une grandeur quantitative associée à la distance, qui est capitale.

qui ne se tient *pas* fermement, ne reste pas en place, est toujours en devenir, sur le point d'être autre, mais au contraire ce qui se tient fermement par soi-même, ce qui est donné stable en soi-même, à l'intérieur de soi-même, et pour ainsi dire par référence intrinsèque. En d'autres termes, l'instant n'est pas in-stable, mais plutôt auto-stable ou intra-stable.

Cette compréhension de la notion d'instant correspond bien au *réalisme instantané exclusif* discuté ci-dessus, pour lequel la réalité physique est considérée totalement et exclusivement donnée par l'état du monde à chaque instant, qui non seulement forme un tout par soi-même, mais forme en définitive « le » tout.

Discussion I.2 Il est aisé de voir, cependant, que cette conception de la réalité est globalement problématique, et se heurte à des difficultés profondes touchant à la question du mouvement ou du changement, comme l'avait clairement perçu Zénon, il y a près de 2500 ans. On se souvient en particulier de son paradoxe du mouvement dans lequel il montrait qu'une flèche ne pouvait pas se mouvoir vers sa cible en passant d'instant en instant d'une position à la suivante, puisqu'en chaque instant la flèche ne pouvait évidemment se trouver nulle part ailleurs que là où elle était, et qu'elle était donc à chaque instant immobile. Comment alors une succession d'états d'immobilité pourrait-elle conduire à un mouvement ? Les mathématiques ont fourni depuis lors des outils permettant de traiter certaines questions relatives à l'infini et à la continuité qui s'appliquent directement aux situations considérées par Zénon et permettent de résoudre les aspects les plus immédiats de ses différents paradoxes.

Zénon d'Élée (~ 490, ~ 420)

Il n'en reste pas moins que pour parler de mouvement ou de changement, il faut pouvoir comparer deux états du monde à deux instants distincts, et constater qu'ils sont différents. Or puisque la conscience n'est jamais ailleurs qu'en son propre présent, que l'intuition dont nous avons parlé identifie comme « le » présent, il est par principe impossible de comparer deux états du monde correspondant à des instants différents. Comme le notait déjà saint Augustin avec une parfaite clarté :

Augustin d'Hippone
(354–430)

« Il est maintenant clair et évident que les choses futures ni les choses passées ne sont point, et que c'est improprement qu'on dit : il y a trois temps : le passé, le présent, le futur, mais sans doute dirait-on correctement : il y a trois temps, le présent des choses passées, le présent des choses présentes, le présent des choses futures. »

Pour comparer deux états et attester de leur différence, il faut les avoir tous deux conjointement en vue ; il faut pouvoir les considérer l'un et l'autre sur un pied commun et avec la même objectivité. Or comment pourrions-nous tenir le passé en vue pour établir que l'état présent du monde représente par rapport à lui un changement, si ce passé ne fait pas partie de la réalité, s'il n'existe pas ? Ce passé que nous prétendons comparer au présent, ce n'est pas le passé, mais une certaine idée présente du passé, et c'est toujours au présent et *dans l'instant* que notre conscience se présente à elle-même une pluralité d'instant du monde et d'instant conscients successifs. Il y a dans cet état de fait, où la notion de *mémoire* joue un rôle central et où s'établit notre perception intuitive du temps, quelque chose d'éminemment mystérieux, mais aussi de directement contradictoire avec la vision du monde que nous avons décrite, et qui constitue la base de ce réalisme intuitif et naïf adopté par la Physique classique.

Répetons-le : à supposer que la vision classique du monde soit correcte, c'est-à-dire que la réalité du monde soit déterminée entièrement et absolument par l'ensemble des phénomènes se manifestant à un instant donné, pour qu'il y ait perception d'un changement dans l'état du monde il ne suffit pas qu'il y ait véritablement un changement dans la réalité, il faut encore que nous puissions en avoir conscience, et donc que nous ayons accès, au sein d'une même perception consciente, à deux états instantanés du monde perçus chacun comme réels et clairement identifiés, et cependant séparés radicalement l'un de l'autre, puisqu'appartenant à des réalités mutuellement exclusives. Deux remarques s'imposent alors :

1. si la conscience présente d'un certain passé fait entièrement partie de la réalité présente du monde, et si par conséquent la perception de tout changement et de tout mouvement n'est qu'une lecture directe (à chaque instant) de *l'état présent du monde*, une telle perception consciente n'a nullement besoin qu'il y ait réellement eu un passé distinct, conforme à ce qui est inféré au sein de cet état présent du monde, et il ne peut y avoir aucune garantie quant à la réalité de la pluralité des instants, et donc quant au changement lui-même⁸ ;
2. si nous tenons néanmoins à considérer comme essentiellement correcte et valide notre intuition ordinaire d'une réalité physique évolutive, établie dans la succession des états du monde relatifs à des instants linéairement ordonnés, il nous admette qu'il existe un certain niveau de réalité qui transcende les limitations exclusives de l'instant, et permet d'englober plusieurs instants au sein d'une même perspective, qui se trouve ainsi chargée d'une véritable pertinence par rapport à la réalité. Ce niveau de réalité transcendant (par rapport à la réalité du monde manifesté, tel qu'envisagée par la Physique classique et telle que révélée par l'intuition mécaniste ordinaire), c'est d'ailleurs ce qu'investit ou tente d'investir la Physique en établissant des *lois* reliant explicitement, dans un formalisme commun et dans une perspective temporelle étendue, les différents instants du

⁸Autrement dit, si nous avons conscience d'un changement entre états, cette conscience est une conscience présente qui repose entièrement sur l'état présent du monde, et ne nécessite donc nullement qu'il ait existé par le passé un certain état qui, dans le présent actuel, n'a de toute façon pas la moindre réalité.

monde pourtant mutuellement exclusifs,⁹ et c'est dès lors aussi ce qui donne une certaine objectivité au temps lui-même : en tant qu'il établit une distinction entre existants non-coexistants (voir ci-dessus), le temps lui-même ne peut s'établir dans aucun instant spécifique, et sa réalité doit donc transcender la réalité physique que l'intuition classique circonscrit aux instants individuels. Si le temps doit avoir une quelconque pertinence, ce ne peut être que hors de l'instant, et si l'on doit le considérer comme autre chose qu'une pure illusion, il est donc nécessaire d'envisager un niveau de réalité débordant le cadre de l'instant, et réfutant par là-même le réalisme instantané exclusif initialement introduit.¹⁰

Albert Einstein (1879–1955)

Compte tenu de ces remarques, il est intéressant de noter que le développement de la Physique et l'approfondissement des notions intuitives d'espace et de temps ont conduit à dépasser et à abandonner complètement le réalisme instantané, au sein d'un cadre conceptuel qui confère à l'ensemble des événements du monde physique se produisant à *tous les instants* le même degré de réalité *conjointe*, sans aucune exclusivité temporelle, et qui va même jusqu'à éliminer totalement la notion de simultanéité ! Dans ce cadre, qui est celui de la théorie de la Relativité d'Einstein, il y a ainsi coexistence de tous les instants et de tous les états du monde, ce qui élimine de façon pour ainsi dire triviale un certain nombre des problèmes mentionnés ci-dessus associés à une conception naïve de la réalité physique (sans toutefois élucider, bien sûr, le phénomène de la conscience). Mais on voit également que cette perspective modifie profondément la notion ordinaire de changement et de mouvement, et s'oppose radicalement à l'intuition commune, au point de nous faire percevoir comme paradoxales certaines situations physiques pourtant attestées par l'expérience et décrites de façon parfaitement naturelle dans le cadre de la Relativité Restreinte. ●●●

Avec l'espace, le temps et la matière, nous venons d'introduire les trois notions fondamentales qui sont les ingrédients de base de la description classique du monde. Ces notions nous sont en quelque sorte imposées par notre expérience quotidienne et par l'intuition particulière de la réalité physique qui résulte de notre participation sensible et cognitive au monde. Dès lors, même si l'idéalisation que nous avons présentée de ces notions, à proprement parler *naïves*, comporte des risques, voire des inconsistances, le simple fait qu'elle puisse émaner de notre expérience du monde en garantit une certaine pertinence pour la description et l'analyse de cette expérience, du moins dans des conditions qui ne s'écartent pas trop du cadre expérimental ordinaire. Il ne doit donc pas nous surprendre, d'une part, que ce soit effectivement le cas, c'est-à-dire que la Physique classique décrive avec une grande efficacité les processus mécaniques se manifestant à notre échelle (spatiale, temporelle et matérielle, i.e. macroscopique), et d'autre part que cela cesse d'être le cas lorsqu'on s'éloigne du cadre de l'expérience immédiate, comme l'indiquent à la fois le développement de la Physique du XX^e siècle et une réflexion philosophique plus poussée sur les fondements de la Physique.

Mais il est intéressant de noter que les notions secondaires rencontrées dans le cadre de l'étude et de la formalisation classique du monde physique conservent une pertinence très grande et même renforcée dans le cadre de la physique quantique et relativiste. C'est le cas notamment des notions d'énergie, de quantité de mouvement (ou impulsion) et de moment cinétique, que nous introduirons et étudierons, dans leur cadre classique, dans les chapitres suivants. Voilà qui offre une justification supplémentaire à ce que, même au XXI^e siècle, nous nous penchions sur l'étude formelle de l'intuition mécaniste classique.

Pour conclure ce paragraphe, nous rappellerons donc simplement le contenu essentiel de cette intuition : la conscience n'est pas vide, il y a donc des *phénomènes*, et leur perception nous induit à considérer qu'il y a « quelque chose » (la matière), qu'il y a de l'étendue, c'est-à-dire qu'il y a des *lieux* distincts, du « ici » et du « là » (l'espace), et qu'il peut y avoir « quelque chose ici » et « quelque chose là », et enfin que l'*état du monde* évolue, c'est-à-dire que l'on peut considérer des états distincts, identifiés en eux-mêmes – des *instants* –, qui ne sont pas coexistants mais qui s'organisent linéairement suivant un

⁹On notera au passage qu'en décrivant l'*évolution* de la réalité physique, et donc en considérant un lien entre états non-coexistants du monde, la Physique s'établit explicitement comme une *méta*-physique, un discours sur la réalité physique associé à une perspective élargissant le réel *au-delà* de ce qui constitue le cadre restreint et restrictif du monde des phénomènes, du monde physique phénoménal et manifesté, au sens où nous l'avons introduit plus haut.

¹⁰Considérer le temps comme une pure illusion ne modifie d'ailleurs pas fondamentalement la situation, puisqu'il demeure alors à comprendre l'origine et la nature de cette illusion, et de son établissement effectif en tant qu'illusion *temporelle*. Les deux cas n'en sont donc qu'un, puisque ce qui nous intéresse, en définitive, c'est le *phénomène* temps, et plus généralement, la *manifestation* du monde physique en tant que phénomène spatial, temporel et matériel (du moins pour ce qui concerne la composante relative à l'intuition mécaniste).

cadre extérieur à eux-mêmes (le temps).

Ainsi perçu, le monde physique constitue ce qu'on pourrait appeler un « espace-temps-matière », que la Physique se propose d'étudier en explorant ses caractéristiques (donc en expérimentant), en révélant sa structure interne (donc en formalisant), en identifiant des lois (donc en rationalisant), et en tentant d'élucider sa nature (donc en philosophant).

espace-temps-matière

I-3 Qu'est-ce qu'une loi physique ?

La notion de loi physique est, elle aussi, issue de notre expérience commune de la Nature, et il suffit de tenter d'imaginer un monde sans loi aucune pour saisir l'essentiel de ce qu'elle recouvre.

Une loi, en Physique, est simplement l'expression d'une relation systématique entre des phénomènes identifiables séparément. Par exemple, les deux phénomènes correspondant au lâcher d'une pomme à un mètre du sol et à son arrivée sur le sol ne sont pas étrangers l'un à l'autre : ils interviennent généralement dans une séquence commune, le premier précédant le second, avec un intervalle de temps constant entre les deux, du moins dans des conditions génériques. Ces conditions génériques sont le plus souvent implicites, et il est impossible de les énoncer toutes en pratique. Il faudrait par exemple préciser qu'on lâche la pomme sans lui donner d'impulsion initiale, que personne n'attrapera la pomme pendant sa chute, qu'il n'y a pas de vent puissant, que le sol ne se déplace pas entre les deux événements, que c'est dans l'air, et non dans l'eau, qu'on lâche cette pomme, qu'on est sur la Terre, à une altitude donnée, et non sur la Lune, etc.

loi physique

Identifier une loi physique, c'est donc non seulement identifier une constante de la nature (comme ici la durée de la chute d'une pomme d'une hauteur de un mètre), mais aussi les circonstances précises dans lesquelles la relation qu'elle exprime entre des phénomènes est observable ou tout du moins pertinente. On voit ainsi qu'une loi physique n'identifie pas seulement un rapport particulier entre des phénomènes individuels, mais toute une classe de phénomènes présentant entre eux un rapport identique, et ce sont tout autant les classes de similitude formées par les phénomènes que les liens qu'ils manifestent que la loi physique met en lumière.

classes de phénomènes similaires

Il s'agit là d'un élément très important, car c'est par l'identification de ces classes de phénomènes similaires que la Physique révèle des structures sous-jacentes à la réalité expérimentale, qui ne sont pas de simples formes transitoires contingentes mais des structures intrinsèques à la manifestation physique elle-même, et de ce fait transposables d'un contexte à un autre (par exemple d'un lieu à un autre, ou d'un instant à un autre), moyennant quelques précautions opératoires. Ces précautions, qui assurent ce que l'on appelle la « reproductibilité » des expériences, font d'ailleurs partie de la définition même des classes de similitude mentionnées, dans la mesure où elles caractérisent les circonstances qui doivent être conçues comme pertinentes ou non pertinentes vis-à-vis des phénomènes donnés.

Pour fixer les idées, dans l'exemple de la chute d'une pomme, des circonstances telles que la couleur des fleurs environnantes, la marque de la montre portée par l'expérimentateur, le nom de l'oiseau qui se pose sur une branche voisine ou la luminosité de l'étoile qui se trouve exactement à la verticale du lieu de l'expérience dans une galaxie extérieure, ne font pas partie du phénomène considéré. C'est implicite dans notre façon même de concevoir le monde, mais il est important de réaliser que cette évidence, en elle-même, dit quelque chose sur le monde, ou tout du moins sur l'intuition que nous en avons.

L'existence de ces classes de similitude parmi les phénomènes n'est pas garantie *a priori*, et l'on peut se demander s'il n'est pas illusoire d'imaginer qu'on puisse véritablement parler de loi physique générale et universelle, transposable d'un contexte à un autre, précisément parce que les contextes ne cessent de varier et que, dans le détail, rien ne se présente jamais de manière exactement identique à ce qui s'est déjà présenté ailleurs à un autre moment. Mais la recherche de conditions idéalisées, permettant de faire abstraction des détails non pertinents vis-à-vis du phénomène étudié, est justement

motivée par la volonté d'identifier des structures fondamentales de la réalité physique, indépendantes du contexte. Il n'était certes pas évident, *a priori*, que de telles conditions idéalisées pussent être identifiées, mais force est de constater que c'est bel et bien le cas, et que c'est même de façon tout à fait ordinaire que nous sommes confrontés à des classes de phénomènes similaires, à tout niveau d'approximation pertinent.

On remarquera d'ailleurs que c'est là une condition *sine qua non* de l'intelligibilité du monde. Comment les mots mêmes pourraient-ils avoir la moindre signification s'il n'y avait pas quelque structure un tant soit peu générale et transposable qui leur corresponde ? Ce n'était déjà qu'en référence à de telles classes de phénomènes idéalisés que nous avons pu parler, ci-dessus, de la chute d'une pomme d'une hauteur de un mètre. Le mot *pomme* ne saurait rien évoquer si un certain *phénomène pomme* n'avait pas été préalablement repéré comme une constante de la Nature, quelque chose que l'on peut trouver ici ou là, retrouver un peu plus tard ou l'année suivante, ou que l'on peut décrire par référence à d'autres notions stabilisées. De même pour la notion de chute, dont l'évocation renvoie à une succession de positions ordonnées d'une certaine façon, qui, en soi, constitue elle aussi une constante du monde, identifiable dans une grande variété de contextes. Et ainsi de suite... On voit, par ces simples considérations, comment l'intuition mécaniste fait appel dans sa constitution même à la notion implicite de loi physique, et comment inversement la notion de loi physique s'appuie sur l'identification de notions constituées, d'objets et de phénomènes apparentés, de sorte que le monde physique nous est donné globalement, non seulement avec les notions constitutives de l'espace-temps-matière, mais aussi avec la notion de loi, c'est-à-dire de constance des rapports entre phénomènes idéalisés, qui en fait indissociablement partie. Sans doute conviendrait-il ainsi de parler d'*espace-temps-matière-phénomènes* pour désigner la forme que prend intuitivement pour nous la réalité physique.

abstraction Un phénomène concerné par une loi physique est donc un phénomène idéalisé, identifié dans ses caractères essentiels et dégagé du contexte particulier qui le fait apparaître. Il s'agit, au sens propre, d'une « abstraction » : tout phénomène auquel nous nous référons par ses différents caractères, auquel nous sommes capables de donner un nom ou que nous pouvons ne serait-ce qu'identifier mentalement, est un phénomène *abstrait* (« tiré hors ») de son contexte, *abstrait* de tout ce qui le relie spécifiquement au monde physique, mais qui n'est pas significatif du point de vue de ce phénomène.

distinction En abstrayant ainsi le phénomène de son contexte, pour l'étudier dans ses rapports avec d'autres phénomènes idéalisés, nous l'isolons en lui-même, nous le distinguons implicitement de la réalité physique particulière qui, au sens propre, le *met en scène*, c'est-à-dire l'inscrit dans une scène plus large composée d'un ensemble de phénomènes.¹¹ Ces autres phénomènes peuvent, certes, influencer sur lui, mais ils n'interfèrent pas explicitement avec lui, ne participent pas à sa définition. C'est donc en définitive ce processus d'abstraction lui-même qui fonde la notion de phénomène distinct et intrinsèquement constitué. De fait, toute approche de la réalité physique passe par une *distinction* (qui tient les choses à l'écart les unes des autres, cf. la discussion au §I-2) : distinction entre des lieux (espace), distinction entre des instants (temps), distinction entre des corps physiques (matière), mais aussi distinction entre les phénomènes physiques eux-mêmes, « abstrayables », au moins dans une certaine mesure, et dès lors susceptibles d'être envisagés dans leurs relations et leurs rapports mutuels.

Notons que par ce processus d'abstraction, nous prenons un certain risque vis-à-vis du réel, dans la mesure où nous procédons à des découpages au sein de la réalité physique, circonscrivant des phénomènes et établissant des distinctions que la réalité physique, elle, n'établit pas nécessairement. Ces distinctions ne sont certes pas arbitraires, puisqu'elles nous sont en quelques sorte imposées par notre expérience sensible et biologique, et présentent donc un niveau de pertinence effectif au moins dans un domaine de la réalité physique. Mais il reste possible qu'une étude plus approfondie des phénomènes révèle que certains éléments contextuels jugés non significatifs, ou même simplement non

¹¹Le contexte sémantique du théâtre peut également s'appliquer lorsqu'on dit d'un phénomène qu'il *se produit* (sur la scène du monde) :-)

perçus, sont en réalité déterminants à un autre niveau ou dans un autre domaine du champ d'expérience.

Discussion I.3 Nous avons présenté la notion de loi physique comme l'expression d'un rapport invariable et universel entre phénomènes intrinsèquement définis, indiquant plus précisément que ces lois portaient sur des classes de similitude de phénomènes. Ceci implique que les lois relatives à certains représentants de ces classes doivent s'appliquer identiquement aux autres. Il n'y aurait pas de « loi physique », en effet, si des phénomènes jugés identiques entretenaient des rapports différents.

Mais on décèle facilement dans cette approche une forme de tautologie caractéristique du type de formalisation rencontrée en Physique. D'une part, une loi physique est définie comme rapport universel et invariable entre phénomènes identiques, et d'autre part, les phénomènes physiques sont définis comme étant identiques s'ils forment des classes de similitude caractérisées par des rapports structurels identiques, c'est-à-dire des comportements universels et invariables. Ces définitions se renvoient l'une à l'autre : la définition d'une loi fait référence à des classes de phénomènes identiques, et en retour l'identité des phénomènes se définit par leur stabilité vis-à-vis des lois. Dans ces conditions, une loi quelconque ne saurait être prise en défaut, puisqu'en cas de non respect manifeste, il est toujours possible de *sauver la loi* en dénonçant les phénomènes concernés comme étant, en fin de compte, non identiques, par quelque caractéristique inconnue ou négligée.

Ce qui donne néanmoins de l'intérêt aux notions de lois et de phénomènes identiques (isolables au sein d'une réalité contextuelle indépendante), c'est que ces notions sont capables d'embrasser de vastes domaines de la réalité physique à partir d'un nombre restreint d'éléments intelligibles. Si, à chaque nouvelle tentative, il fallait invoquer une nouvelle loi pour caractériser le temps de chute libre d'une pomme, on pourrait se dire soit que la notion de loi n'est pas intéressante dans ce contexte, soit que le phénomène de la chute libre ou que le phénomène « pomme » lui-même n'a pas de pertinence et qu'il est étranger à la structure véritable de la réalité physique.

Si, en revanche, nous sommes capables d'isoler des classes de phénomènes généraux et récurrents, manifestant entre eux des rapports identiques, ou une série de rapports facilement appréhendables dans une perspective commune et unifiée, alors nous pouvons estimer avoir identifié une structure significative au sein de la réalité physique, une forme non arbitraire, entretenant un rapport de correspondance effective avec le réel sous-jacent.

Dans ce cas, la tautologie mentionnée ci-dessus peut-être comprise comme la formalisation sémantique d'un rapport existant bel et bien dans le monde physique. C'est ce que nous pourrions appeler une *tautologie pertinente*. De la même façon, le mot « pomme », qui est employé pour désigner... une pomme (sic!), est en lui-même arbitraire, mais sa pertinence tient à ce qu'il peut être utilisé dans des contextes variés et conférer un sens à de nombreuses phrases l'utilisant, pas seulement lors d'un lâcher de pomme particulier, mais de façon stable à travers l'espace, le temps et les situations contextuelles. Dès lors, l'identification d'un « objet pomme » n'est *pas* arbitraire : elle est imposée par des aspects effectifs de la réalité, que notre expérience du monde a permis de mettre en lumière et de formaliser au sein du langage.

tautologie pertinente

Il en est exactement de même pour les phénomènes de l'espace-temps-matière sur lesquels portent les lois physiques. Leur pertinence, comme classes de phénomènes similaires transposable de contexte en contexte, est attestée par le fait qu'ils entrent en combinaison au sein de lois générales et pérennes, de même que la pertinence de ces lois tient à leur généralité et à leur pérennité vis-à-vis des phénomènes. Faire de la physique, c'est dès lors rechercher non pas des structures particulières apparaissant ici ou là sur la scène du monde, mais des structures générales indépendantes du contexte. C'est à ce titre que la Physique est susceptible de nous renseigner sur l'essence même de la réalité physique, en tant que *manifestation*.¹²

Insistons à nouveau sur le fait qu'on ne saurait concevoir un monde physique sans loi aucune, puisque le simple fait de parler de corps matériel, d'objet, implique une certaine permanence (dans le monde physique et dans la conscience) de l'entité qu'il représente. Cette permanence est déjà une forme de loi, qu'on pourrait formaliser ainsi : si l'objet considéré est « ici » à un instant donné *et que rien de spécial n'intervient*, il y est encore à un instant suivant, et quand bien même il se retrouverait ailleurs, nous serions toujours en mesure de le reconnaître en ce nouveau lieu, c'est-à-dire que nous pouvons juger spontanément de l'identité de sa manifestation intrinsèque en différents instants. Si l'on ne rencontrerait jamais de situations où « rien de spécial n'intervient », dans le sens ci-dessus, et qu'il ne soit pas possible d'observer, en aucune circonstance, la permanence de quelque chose quelque part (i.e. d'un corps matériel en un lieu de l'espace), alors la notion même de chose disparaîtrait, tout comme la notion de localisation, et donc d'espace. ● ● ●

Discussion I.4 L'identification des lois comme *constantes* de la manifestation physique appelle également quelques commentaires. Pourquoi faudrait-il, après tout, que les rapports susceptibles d'exister entre différents phénomènes soient constants, identiques à eux-mêmes à travers le temps et l'espace ?

¹²c'est-à-dire en tant que déploiement organisé de phénomènes perceptibles par une conscience, le mot conscience faisant ici simplement référence à cela même à quoi se manifeste ce qui se manifeste (c'est-à-dire la manifestation elle-même !)

Cette question touche à la notion d'homogénéité de l'espace-temps, sur laquelle nous reviendrons. Mais nous pouvons déjà noter qu'une structure relationnelle entre phénomènes qui ne serait valable qu'en un lieu donné et pendant un intervalle de temps restreint ne correspondrait pas à la notion intuitive que nous avons d'une *loi*.

**Universalité des lois
de la manifestation
physique : indépendance
vis-à-vis du contexte**

En droite ligne de ce qui précède, une loi n'est pertinente, comme expression d'une vérité sur le monde physique manifeste, que si elle est une condition intrinsèque de la manifestation elle-même, et non tributaire d'un contexte spécifique et contingent. La réalité phénoménale peut, elle, évoluer avec le temps, mais ceci doit être rattaché à une évolution du contexte, fût-ce l'évolution d'un contexte très large, cosmologique, apparemment dissocié des phénomènes étudiés. Si la durée de chute libre d'une pomme devait dépendre du lieu ou du moment où l'on effectue l'expérience, on n'estimerait avoir identifié une loi relative à cette chute libre que lorsqu'on aurait découvert la loi qui décrit justement l'évolution de cette durée. Cette loi, elle, ne dépendrait pas du moment considéré, mais permettrait au contraire de connaître le comportement de chute libre des pommes à tous les instants (et *comme cas particulier* à l'instant spécifique considéré).

On distingue aisément dans ce schéma différents niveaux de loi. En passant d'une loi de bas niveau, dépendant du contexte, à une loi de niveau plus élevé décrivant *comment* la loi de plus bas niveau dépend du contexte, on révèle un niveau de réalité plus vaste, plus général, au sein duquel la réalité initialement apparente est comprise comme particulière, locale, et non essentielle. Et dans la mesure où elle s'intéresse à l'essence du monde des phénomènes et de la manifestation, la Physique recherche donc des lois le plus générales possibles, des vérités indépendantes du contexte local (spatial, temporel ou matériel¹³), des *lois-cadres* plutôt que des lois *au sein* d'un cadre. Les vérités plus vastes, de niveau supérieur, sont des vérités sur un ensemble de vérités, et une loi physique ne devient intéressante que lorsqu'elle atteint une généralité qui lui permet d'englober en une seule formulation simple, un ensemble très vaste de vérités factuelles. Dans l'exemple de la pomme, cet ensemble est même infini si l'on parvient à identifier une loi donnant la durée de la chute libre depuis *n'importe quelle hauteur* et dans *n'importe quel* contexte (par exemple, sur *n'importe quelle* planète et à *n'importe quelle* altitude)!

Là encore, c'est le fait que le monde physique prenne effectivement place dans un schéma descriptif présentant une universalité de ce genre qui valide *après coup* la pertinence de cette approche. De fait, des lois ont pu être identifiées qui, à tout niveau d'approximation actuellement accessible à l'investigation, se sont révélées indépendante du contexte. Et chaque fois que le contexte s'est avéré influencer les relations structurelles du monde phénoménal, la Physique s'est employée à comprendre ces modes d'influence du contexte, en adoptant un point plus général capable d'embrasser ledit contexte et les phénomènes étudiés dans une même description et une même compréhension. C'est de cette façon qu'il est possible, à la lumière de la Physique, d'accéder à un niveau de réalité plus universel, plus *absolu*¹⁴ et plus essentiel.

Notons enfin que l'universalité des lois les plus fondamentales concerne leur statut, non leur contenu. En particulier, elle n'implique pas que les lois fixent toujours des rapports constants entre phénomènes. C'est la loi qui est universelle, pas forcément les phénomènes ou séquences de phénomènes. Pour reprendre l'exemple de la chute libre d'une pomme, il n'est pas exclu *a priori* que la durée de la chute d'une hauteur de un mètre soit variable par essence, indépendamment du contexte, et en fait aléatoire. Si telle est la structure foncière de la réalité, et qu'il n'y ait rien de plus à en dire, alors soit. Mais cela n'empêche pas d'énoncer une loi universelle au sujet du phénomène de la chute libre des pommes : cette loi traduirait simplement la vérité physique relative à ce phénomène, à savoir que la durée de la chute est aléatoire.

● ● ●

I-4 Mesures et grandeurs physiques

I-4-a Notion de quantité

qualitatif/quantitatif

Le regard que nous portons sur le monde physique est toujours double : *qualitatif* et *quantitatif*. Il est qualitatif lorsque nous disons qu'il y a une pomme, qu'il y a la Terre, que la pomme tombe, ou encore qu'il y a une attraction réciproque de la pomme et de la Terre (car, ne l'oublions pas, la Terre tombe elle aussi sur la pomme !). Il est qualitatif, encore, lorsque nous disons que la chute de la pomme sur la Terre n'est pas instantanée, qu'elle s'inscrit dans une durée et qu'elle prend donc *un certain temps*. Et il est quantitatif lorsque nous disons *combien de temps* dure la chute : 1 seconde, 3 secondes, ou 12,5 secondes....

Cet aspect quantitatif fait partie intégrante de la forme intuitive que prend le monde physique pour nous (et au moins pour de nombreux animaux). Que nous considérons l'espace, le temps ou la matière, l'aspect quantitatif ne peut tout simplement pas être évité. Comme nous l'avons indiqué plus haut (cf. §I-2), la notion d'espace se présente comme ce qui fait exister conjointement « ici » et « là », ce qui tient à distance ceci et

¹³toujours nos trois notions fondamentales...

¹⁴Au sens de *ce qui existe indépendamment de toute condition ou de tout rapport avec autre chose* (Le Petit Robert).

cela. C'est l'aspect qualitatif, en quelque sorte fonctionnel, de l'espace : qualitativement, l'espace distingue des lieux. De même, qualitativement, le temps distingue des instants, et la notion de matière, comprise comme la "substance des choses", provient directement de la distinction de ces choses, c'est-à-dire de l'identification de phénomènes distincts ayant une certaine permanence autonome, donc séparée, dans la réalité physique (cf. §I-3).

Or ces distinctions, déjà identifiées au §I-3 comme fondamentales et indissociables de toute forme de manifestation physique, conduisent inévitablement à la notion de quantité, puisque par essence, une distinction donne accès à la considération simultanée de *plusieurs* (au moins deux !) éléments de même nature, c'est-à-dire au sein d'une même catégorie (par exemple la catégorie des lieux, la catégorie des instants, ou la catégorie des choses).

Pour que l'espace soit vraiment l'espace, au sens où il distingue (ou *distancie*) un lieu d'un autre, il faut au minimum *deux* lieux, ce qui introduit inévitablement la quantité.¹⁵ Si l'on peut considérer deux éléments d'un même ordre, d'une même catégorie, on peut aussi en considérer trois, quatre, douze ou vingt-cinq. C'est le cœur même, non plus de la Physique, mais de l'arithmétique ! Et si la description du monde physique qui s'est développée au cours de l'histoire repose sur une formulation mathématique, c'est explicitement et inévitablement pour cette raison. Dès lors que le monde, outre son versant qualitatif, présente un versant quantitatif, son étude détaillée passera tôt ou tard par la question « combien » ?

I-4-b Dimension physique et unité

Les notions de *dimension physique* et d'unité sont des notions techniques fondamentales pour la Physique actuelle. Essentiellement, elles fournissent un cadre indispensable à l'étude quantitative de l'espace-temps-matière, en permettant de répondre à la question « combien ? » lorsqu'il est impossible d'y répondre de manière strictement arithmétique, c'est-à-dire par comptage, ou par dénombrement d'entités élémentaires indivisibles.

Unité et arithmétique Si nous considérons des pommes, la notion de « quantité » est facilement appréhendable, et coïncide exactement avec la notion arithmétique, associée aux nombres. Mesurer la quantité de pommes, c'est simplement compter leur nombre, et compter des pommes, c'est déterminer combien d'unités « pomme » se trouvent conjointement présentes dans l'ensemble considéré. L'*unité* de mesure, comme son nom l'indique, est ici la pomme *unique*, considérée dans son unité constitutive, comme référence abstraite à laquelle toutes les pommes peuvent, par principe, être rapportées de manière exacte et identique. C'est en ce sens que l'unité de référence « pomme » est abstraite : chaque pomme peut à bon droit être considérée comme unité de référence, puisque la pomme-unité a été *abstraite* de ses attributs particuliers, afin que, pour ce qui concerne le comptage, toutes les pommes soient absolument et intégralement équivalentes.

Dans le monde physique, il va de soi que si nous comptons cinq pommes, chacune de ces pommes est spécifique, et nous n'avons pas réellement cinq exemplaires d'une même chose. Mais puisque l'unité-pomme a été idéalisée, abstraite de toute particularité individuelle, pour ne conserver d'elle que ce qui nous permet de dire qu'elle est pomme (et non poire ou hippopotame), il n'y a pas de difficulté à compter cinq exemplaires identiques de cette idéalisation de pomme. Si en revanche, on se demande combien font cinq pommes et deux galaxies, on ne peut plus rapporter ces différents éléments à une même entité abstraite susceptible de servir d'unité. La question ainsi posée est une impasse... à moins que l'on ne réponde simplement que cinq pommes et deux galaxies, cela fait sept *choses*. Dans ce cas, on a abstrait encore un peu plus les pommes-unités et les galaxies-unités, pour en faire des choses-unités, dont la seule caractéristique pertinente, dans ce contexte, est d'être des

¹⁵NB : cela n'implique pas que les deux lieux distingués soient dissociables d'un continuum spatial unifié, ni qu'il existe quoi que ce soit qui puisse être considéré isolément comme un lieu en lui-même, bien au contraire ! C'est cet acte de distinction même qui "crée" en quelque sorte les lieux distincts, et c'est la nature, voire l'essence de l'espace que de permettre ou d'accueillir un tel acte de distinction, faisant apparaître des lieux distincts, distingués précisément par leur rapport mutuel au sein de cet espace.

“entités individuées” et considérables séparément. Nous n’avons donc pas véritablement additionné des pommes et des galaxies, mais des entités ramenées à une nature commune, également et entièrement partagée.¹⁶

Si ce qui précède paraît évident et trivial, c’est que les quantités numériques ordinaires font partie intégrante de notre perception intuitive de la réalité, et se situent à un niveau très profond de la représentation matérielle objective, que l’on pourrait nommer l’*intuition ensembliste*. Ce n’est pas un hasard si, en mathématiques, on appelle ces nombres, obtenus par adjonction itérative d’un « 1 » unitaire, les *entiers naturels*. On sait que l’on peut aisément obtenir les nombres dits *rationnels* à partir de ces entiers. En prenant comme unité une demi pomme, ou un tiers de pomme, et en faisant de ces fractions de pommes les unités abstraites devant servir de référence pour le comptage, on peut déterminer le nombre de demi-pommes ou de tiers-de-pommes dans un ensemble donné, ce qui revient à exprimer un nombre de pommes au moyen de nombres fractionnaires.¹⁷

En physique, les nombres *entiers naturels*, les nombres *rationnels*, et les nombres dits *réels* (obtenus comme limite à l’infini d’une suite convergente de nombres rationnels, selon une procédure enfin formalisée de manière satisfaisante au XIX^e siècle), sont appelés des *nombres sans dimension*, ou *nombres purs*. Ce sont les nombres de l’arithmétique, qui se rapportent à l’unité la plus fondamentale et la plus abstraite que l’on puisse envisager : le « 1 » absolu et auto-constitué, dont la notion nous est donnée intuitivement, mais qui semble aussi inaccessible à une définition explicite que les notions fondamentales d’espace, de temps et de matière. En fait, la notion d’unité abstraite est directement associée à la notion d’objet, en tant que quelque chose d’isolable et considérable par soi-même dans son intégrité foncière, séparable du contexte et formant une entité individuée qui est *de facto* l’unité naturelle pour le comptage de tous les objets assimilables.

Ce « 1 » absolu de l’arithmétique n’a pas d’attribut, d’aucune sorte : il n’est pas pomme, ni papillon, ni mètre-carré, ni kilogramme. Il peut néanmoins prêter sa valeur d’unité fondamentale à l’un ou l’autre de ces attributs, et s’énoncer alors « 1 seconde », « 1 galaxie » ou « 1 degré ». Mais ayant été ainsi qualifiée, l’unité qui s’en trouve constituée n’est plus *sans dimension*, sans attribut.¹⁸

Déterminer la quantité de pommes dans un panier, c’est déterminer « combien de fois » l’on y trouve l’unité qualifiée *pomme* : une fois, deux fois, sept fois... Dans la proposition « il y a 3 pommes dans ce panier », le nombre « 3 » est un nombre pur : il a la même signification intrinsèque que dans la proposition « il y a trois chameaux sur cette dune ». Mais dès lors que l’on qualifie ce « 3 » au moyen de l’attribut « pomme », la quantité obtenue n’est plus un nombre pur, mais un *nombre dimensionné*.

Cette procédure de comptage d’objets ou d’entités individuelles est très naturelle et très générale : elle s’applique, et s’impose même spontanément, chaque fois qu’on a affaire à un ensemble d’éléments comparables¹⁹ et pour lesquels l’unité de référence est évidente, puisque la quantité recherchée concerne justement des entités distinctes. C’est le cas pour les pommes, les galaxies, les jours ou les mots. Mais dans le contexte de la Mécanique, il en va tout autrement, car il n’y a d’entité singulière isolable naturellement ni pour l’espace, ni pour le temps, ni pour la matière !

¹⁶Il est important de comprendre que c’est l’essence même de la notion de nombre qui nous impose de ne compter que des entités indifférenciées – ou tout du moins considérées dans une perspective qui fait fi de toute différenciation. Les pommes et les galaxies ne peuvent être comptées conjointement que si elles sont ramenées à des entités semblables, et ce qui est compté alors, ce ne sont plus les pommes et les galaxies initiales, mais les entités semblables en question.

¹⁷En mathématiques, on appelle nombres rationnels ces nombres “non entiers”, exprimés comme des rapports de nombres entiers, au sens de la division d’un nombre par un autre, qui exprime leur « rapport » numérique, c’est-à-dire la façon dont la valeur de l’un se compare à celle de l’autre, dont ils se *rapportent* l’un à l’autre. Dans « rationnel », c’est donc bien sûr le sens de « rapport » et non le sens ordinaire de « raison » que véhicule la racine latine *ratio*.

¹⁸Le « 1 » initial, *nombre pur*, inqualifiable, n’est rien d’autre que ce qu’il est en lui-même, et rien d’autre n’est « 1 » de la même façon qu’il l’est, puisqu’une unité qui serait, comme ce « 1 » fondamental, sans attribut aucun, serait *de facto* ce « 1 » fondamental lui-même !

¹⁹c’est-à-dire assimilables individuellement les uns aux autres moyennant une procédure d’abstraction qui en gomme les différences jugées non essentielles dans le contexte considéré

Le cas de l'espace Si l'espace est vu comme un ensemble de points, alors déterminer une longueur, une « quantité d'espace » entre un point et un autre, appelle la question suivante : « combien y a-t-il de points » entre ces deux extrémités ? Et Zénon (cf. Discussion I.2) aurait assurément jubilé en voyant notre trouble immédiat : combien de points... euh... une infinité ! Entre deux points distincts quelconques, il y a au moins leur milieu. Entre ce point milieu et le premier point, il y a encore le milieu de ces deux-ci, puis le milieu de ce nouveau point et du premier, et ainsi de suite. L'espace, dans notre intuition, et par ce raisonnement même, s'instaure comme un *continuum*, et entre n'importe lesquels de ces points, il y en a une infinité d'autres, tous intrinsèquement identiques et indifférentiables. Pourtant nous savons tous donner un sens, intuitivement, à des propositions du type « la distance entre Paris et Marseille est plus grande que la distance entre Paris et Lyon », et ceci malgré le fait que le « nombre de points » est dans chaque cas infini et donc impossible à comparer ou à ordonner arithmétiquement. Comment, dès lors, formaliser la notion intuitive de quantité, lorsqu'il s'agit de l'espace ?

La difficulté vient de ce qu'il n'y a pas, en cette circonstance, d'entité individuelle naturelle permettant de déterminer une longueur par comptage arithmétique. Mais les mathématiques ont formalisé, précisément pour des contextes de ce genre, la notion de *mesure*, permettant d'attribuer une valeur numérique représentative d'une quantité à des ensembles ou espaces (géométriques ou non) infinis.

Nous n'aborderons pas ici la « théorie de la mesure », mais nous pouvons noter, dans le cas qui nous intéresse, que la solution du problème consiste à réaliser – et c'est un pas conceptuel majeur ! – qu'il y a en fait bien plus, dans notre conception intuitive de l'espace, que la notion d'ensemble de points. L'espace, comme nous l'avons mis en lumière au §I-2, est donné d'emblée, et même essentiellement, avec une notion de distance, c'est-à-dire, comme on le dit en mathématique, avec une *structure métrique*. Une structure métrique est une propriété intrinsèque de l'ensemble de points considéré, qui définit de manière univoque la notion de distance entre deux points quelconques, au moyen d'une fonction (au sens mathématique), qui à n'importe quel couple de points associe une valeur numérique appelée distance, et qui vérifie quelques propriétés élémentaires.²⁰ Muni de cette fonction *distance*, l'ensemble de points forme ce que l'on appelle un « espace métrique », c'est-à-dire tout simplement un espace dans lequel la notion de distance est définie. Il est important de comprendre que cette notion est surajoutée : en aucun cas elle ne peut être déduite ou construite à partir du seul « ensemble de points » initial.

Dans le cas du monde physique ordinaire, une notion de distance nous est de fait intuitivement donnée, indissociable de l'ensemble des points (ou des lieux) sur lequel elle est définie : il s'agit de la « distance euclidienne », correspondant à l'intuition géométrique formalisée par Euclide dans ses fameux *Éléments* et à l'application du fameux « théorème de Pythagore ». Cette géométrisation de l'espace physique est tellement naturelle qu'il a fallu attendre le XIX^e siècle pour comprendre qu'il y avait d'autres géométries possibles (non-euclidiennes, donc), et le XX^e siècle (et la théorie de la Relativité Générale) pour réaliser que notre monde physique n'avait *pas* la géométrie euclidienne, et qu'en outre sa géométrie était variable, au sens où la façon même dont sont déterminées les distances entre les points dépendait du contexte matériel, du lieu et du moment ! Mais c'est une autre histoire... ;-)

Euclide (~ 325, ~ 265)

D'un point de vue pratique, la solution au problème de la quantité d'espace entre deux points est en fait très simple : elle consiste, puisqu'il n'y a pas d'entité individuée pouvant naturellement servir d'unité, à en définir une arbitrairement ! C'est ainsi qu'un mètre étalon peut être gravé par le *Bureau des poids et mesures* et déposé au *Pavillon de Breteuil* à Sèvres, dans les Hauts-de-Seine.²¹ Ce « mètre étalon », choisi arbitrairement,

²⁰En l'occurrence, une fonction d qui à deux points, M_1 et M_2 , associe un nombre, $d(M_1, M_2)$, est une « distance », si la distance d'un point quelconque à lui-même est nulle, $d(M, M) = 0$, si elle est symétrique, $d(M_2, M_1) = d(M_1, M_2)$, et si elle vérifie l'*inégalité triangulaire* : la distance d'un point à un autre est au maximum égale à la distance obtenue en passant par un troisième : $d(M_1, M_2) \leq d(M_1, M_3) + d(M_3, M_2)$

²¹NB : l'unité de longueur a été redéfinie en 1983 comme étant la distance parcourue par la lumière dans le vide en 1/299 792 458 secondes.

est déclaré « unité » pour les longueurs ! Par convention, il vaut « 1 », et toute longueur égale à la distance entre les points marqués sur cette barre métallique, c'est-à-dire toute longueur *superposable* à cette référence arbitraire, est déclarée valoir 1 mètre.

C'est arbitraire, en effet, mais très pratique ! De fait, cette procédure correspond à la notion intuitive de longueur comme quantité d'espace, puisque c'est toujours par comparaison à quelque longueur de référence que nous estimons les distances entre points. Qu'on utilise les pouces, les coudées ou les journées de cheval, on n'a pas d'autre choix, pour estimer les longueurs, que de se rapporter à une unité arbitraire. Mais une fois cette unité choisie, la mesure de l'espace devient tout à fait univoque. Pour déterminer la distance entre un point et un autre, il suffit de compter le nombre de fois qu'il faut reporter bout à bout des exemplaires identiques de l'unité (ou de ses fractions) pour joindre les deux points. Dès lors que l'unité a été définie, la procédure redevient strictement arithmétique, en tout point semblable au comptage des pommes ou des galaxies. La notion de longueur devient dès lors une grandeur physique à part entière, héritant toutes ses propriétés numériques du modèle arithmétique originel : une longueur de 6 mètres est trois fois plus grande qu'une longueur de 2 mètres.

Le cas du temps Le cas de la mesure du temps est tout à fait semblable. Si une entité individuelle devait être identifiée, pour servir d'unité à une détermination arithmétique de la « quantité de temps » (par comptage), ce serait l'instant. Mais entre deux instants quelconques, il y en a une infinité d'autres, et nous sommes ramenés au problème précédent. Même problème, même solution : pour faire de la durée une grandeur physique susceptible de se voir attribuer des valeurs numériques comparables entre elles, il est possible de choisir arbitrairement une unité de durée, de l'appeler par exemple « seconde », et de compter ensuite le nombre de fois qu'il faut juxtaposer (temporellement) de telles secondes pour couvrir l'intervalle de temps entre deux instants donnés. La valeur numérique obtenue n'aura alors aucune signification en elle-même, mais elle aura un sens *en référence* à l'unité choisie. Dire qu'un phénomène a une durée de 6 n'a strictement aucun sens : 6 quoi ? 6 instants ? Mais dès lors que l'unité est spécifiée, l'arithmétique reprend ses droits, et, comme pour les longueurs, la formalisation mathématique est entièrement conforme à l'intuition : un phénomène s'étalant sur 6 secondes a une durée trois fois plus longue qu'un phénomène s'étalant sur 2 secondes.

Le cas de la matière Enfin, et de la même façon, il n'y a pas d'unité de masse naturelle dans le monde physique ordinaires, et nous n'avons pas d'autre recours que d'en définir une arbitrairement. Dans le système d'unités approuvé au niveau international, il s'agit du *kilogramme*. Cette masse de référence ayant été adoptée, la *quantité de matière* devient à son tour une grandeur physique authentique, manipulable numériquement selon les lois naturelles de l'arithmétique.

Notion de dimension physique Dans ce qui précède, nous avons vu que toute évaluation quantitative d'une grandeur, quelle qu'elle soit, nécessitait l'identification d'une unité de référence. Dans le cas d'un comptage d'objets individuels, l'unité naturelle est constitué par l'un quelconque de ces objets (tous identiquement unitaires). Ainsi peut-on compter cinq pommes dans un panier, douze galaxies dans un amas et sept mots dans une phrase. Nous avons également vu qu'il n'y avait aucun sens à additionner 3 pommes et deux galaxies, car il n'y a pas, dans ce cas, d'unité de référence. On peut toutefois se ramener, par abstraction, à une unité commune, dépossédée de l'attribut *pomme* ou *galaxie*, et percevoir pommes et galaxies non plus dans leur particularité propre, mais simplement dans leur participation commune à la notion d'entité individuée, sans autre précision. Le recours à cette unité commune permet alors le comptage conjoint.

Mais dans le cas de l'espace, du temps ou de la matière, s'il est possible de choisir arbitrairement une unité permettant d'évaluer arithmétiquement les grandeurs, *en référence* à cette unité, il est en revanche impossible, pour autant que la Physique puisse en ju-

ger aujourd'hui,²² d'identifier une entité-unité à laquelle il serait possible de rapporter conjointement les longueurs, les durées et les quantités de matière. C'est en ce sens que nous sommes contraints d'accepter le temps, l'espace et la matière comme appartenant à des dimensions distinctes de la réalité : il est impossible de les compter sur la base d'une unité commune, même définie arbitrairement, d'une manière qui aurait un sens physique pertinent. On peut ramener des kilomètres et des centimètres à une même unité de longueur, afin de les ajouter de manière sensée. On peut faire de même pour le temps, ou la matière. Mais aucune entité physique pertinente n'a pu être proposée pour additionner 3 mètres, 2 secondes et 25 kilogrammes.

Ainsi, tout en constituant conjointement le tissu de la réalité physique au sein de notre intuition mécaniste, espace, temps et matière ne peuvent être traités quantitativement sur la base d'une même unité, aussi abstraite soit-elle. Les grandeurs géométriques spatiales peuvent être mesurées sur la base de la dimension « longueur », dont l'unité (arbitraire) adoptée à l'échelle internationale est le mètre. Les grandeurs temporelles peuvent être mesurées sur la base de la dimension « durée », dont l'unité (arbitraire) adoptée est la seconde. Et les quantités de matière peuvent être mesurées sur la base de la dimension « masse », dont l'unité arbitrairement adoptée est le kilogramme.

Ces trois grandeurs fondamentales, longueur, durée, masse, sont inconciliables, mais il est remarquable que toutes les grandeurs mécaniques rencontrées en Physique, aussi élaborées soient-elles, peuvent toujours se ramener à ces trois dimensions.

[...]

²²de nombreuses tentatives sont à l'œuvre, mais elles n'ont pas encore abouti de manière satisfaisante...